

太行山麻棚地区高 Ba-Sr 花岗质侵入岩的地球化学、 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其地质意义

程海峰¹, 杜利林², 杨崇辉², 苏荣昆³, 孟庆涛¹, 刘广¹, 王明明¹, 张正平¹,
井晶晶¹, 王晓东⁴

(1. 河北省区域地质调查院, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 3. 中国石化西北油田
分公司 勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 4. 河北省地质矿产勘查开发局 第四地质大队, 河北 承德 067000)

摘要: 华北克拉通经历了长期而复杂的地质过程, 中生代时期在太行山地区构造岩浆活动强烈, 形成了一系列中酸性岩体。麻棚岩体位于太行山北段, 侵位于新太古代片麻岩和表壳岩中, 由中心向边缘分别出露似斑状二长花岗岩、花岗闪长岩和石英闪长岩。前人已经对麻棚岩体进行过岩石学、岩石化学、岩体成因类型和年代学等多方面的研究, 其花岗岩类型仍存有争议。本文对麻棚岩体进行了系统的岩石地球化学、锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年代学分析和 Lu-Hf 同位素组成研究, 进一步探讨了麻棚岩体的地球化学类型、形成时代和岩浆源区性质。岩石地球化学特征表明麻棚岩体具有较高的 SiO₂、Na₂O+K₂O、Ba、Sr、LREE 含量和 K₂O/Na₂O 值, 较低的 Al₂O₃、MgO、Rb、Nb、Ta、Th、U、Y、HREE 含量和 Mg[#]值, 无明显的 Eu 异常, 明显亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 属于高 Ba-Sr 花岗岩。新获得的 3 个不同相带岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 同位素 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 129.4±1.4、131.2±2.2 和 129.5±1.3 Ma, 且具有相似主量元素组成及稀土和微量元素分布模式, 反映了麻棚岩体为同一期岩浆活动产物。Lu-Hf 同位素测试分析数据计算获得麻棚岩体岩浆锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -27.00~ -15.44, 二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 2 358~1 765 Ma。麻棚岩体是前寒武纪变质基底部分熔融形成的岩浆与幔源岩浆混合作用的结果。

关键词: 麻棚岩体; 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄; Lu-Hf 同位素; 高 Ba-Sr 花岗岩

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)03-0719-18

Geochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotope characteristics of high-Ba-Sr granites in Mapeng area, Taihang Mountains and their geological significance

CHENG Hai-feng¹, DU Li-lin², YANG Chong-hui², SU Rong-kun³, MENG Qing-tao¹, LIU Guang¹,
WANG Ming-ming¹, ZHANG Zheng-ping¹, JING Jing-jing¹ and WANG Xiao-dong⁴

(1. Institute of Regional Geological Survey of Hebei Province, Langfang 065000, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Petroleum Exploration & Production Research Institute of Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi 830011, China; 4. The Forth Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Chengde 067000, China)

Abstract: The North China Craton (NCC) has undergone a long and complicated geological process. During the Mesozoic, a series of intermediate-acid granitoids were formed in the Taihang Mountains. Mapeng granitic pluton is

收稿日期: 2023-05-19; 接受日期: 2024-01-04; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 河北省 1:5 万区域地质调查项目(13000022P00F2D410209L, 13000023P00F2D4102673, 13000024P00F2D410574E); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190003); 河北省自然科学基金资助项目(D2021403028)

作者简介: 程海峰(1985-), 男, 高级工程师, 主要从事区域地质调查和矿产调查工作, E-mail: 53851470@qq.com。

网络首发时间: 2024-02-04; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240202.1529.004.html>

located in the northern part of Taihang Mountains, emplaced in Fuping complex, with porphyritic monzonitic granite, granodiorite and quartz diorite exposed from the center to the edge. The petrology, petrochemistry, genetic type of Mapeng granitic pluton have been studied by predecessors, but the type and source of granitic pluton are still controversial. In this paper, the petrochemistry, zircon SHRIMP U-Pb isotopic chronology and Lu-Hf isotopic composition of porphyritic monzonitic granite, granodiorite and quartz diorite in Mapeng pluton are systematically studied, and the geochemical type, formation age and magma source nature of Mapeng granite are further discussed. Geochemical magmas show that the Mapeng granite has high SiO₂、Na₂O + K₂O、Ba、Sr、LREE and the ratio of K₂O/Na₂O, lower Al₂O₃、MgO、Rb、Nb、Ta、Th、U、Y、HREE and Mg[#] value, no obvious Eu anomaly and obvious depletion of high field strength elements such as Nb, Ta, P and Ti. The SHRIMP U-Pb isotopic ages of the three newly obtained granites with different facies belts are 129.4±1.4 Ma, 131.2±2.2 Ma, 129.5±1.3 Ma, and they have similar major element compositions and REE and trace element distribution patterns. It also reflects that the Mapeng pluton is a magmatic activity of the same period, and has undergone rapid emplacement and cooling crystallization. Lu-Hf isotopic analysis shows that the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value of magmatic zircon from the Mapeng granite is -27.00~-15.44, and the two-stage model age t_{DM2} is 2 358~1 765 Ma. The magma source of the Mapeng granite is the result of mixing of mantle magma and magma formed by partial melting of Precambrian metamorphic basement.

Key words: Mapeng pluton; zircon SHRIMP U-Pb age; Lu-Hf isotope; high Ba-Sr granite

Fund support: Project of Hebei Province 1:50 000 Regional Geological Survey (13000022P00F2D410209L, 13000023P00F2D4102673, 13000024P00F2D410574E); Project of China Geological Survey (DD2019003); Natural Science Foundation of Hebei Province (D2021403028)

华北克拉通主要由太古宙-古元古代变质基底和中元古代-新生代的盖层组成 (Zhao and Zhai, 2013)。克拉通内部的变质基底经历了长期而复杂的地质过程,古元古代晚期,伴随着克拉通内部裂谷盆地的闭合、进一步陆壳加厚,发生强烈的变质作用,华北最终完成克拉通化(杜利林等, 2020)。中生代时期华北克拉通被破坏(朱日祥等, 2012),中国东部构造岩浆活动强烈,在太行山地区形成了一系列中酸性岩体,它们的侵位时代集中在138~119 Ma之间(牛树银等, 1995; 罗照华等, 1997; 路凤香等, 2000; 陈斌等, 2005, 2009; 蔡剑辉等, 2003, 2005; 夏国礼等, 2005, 2006; 徐义刚, 2006; 李林林等, 2012)。

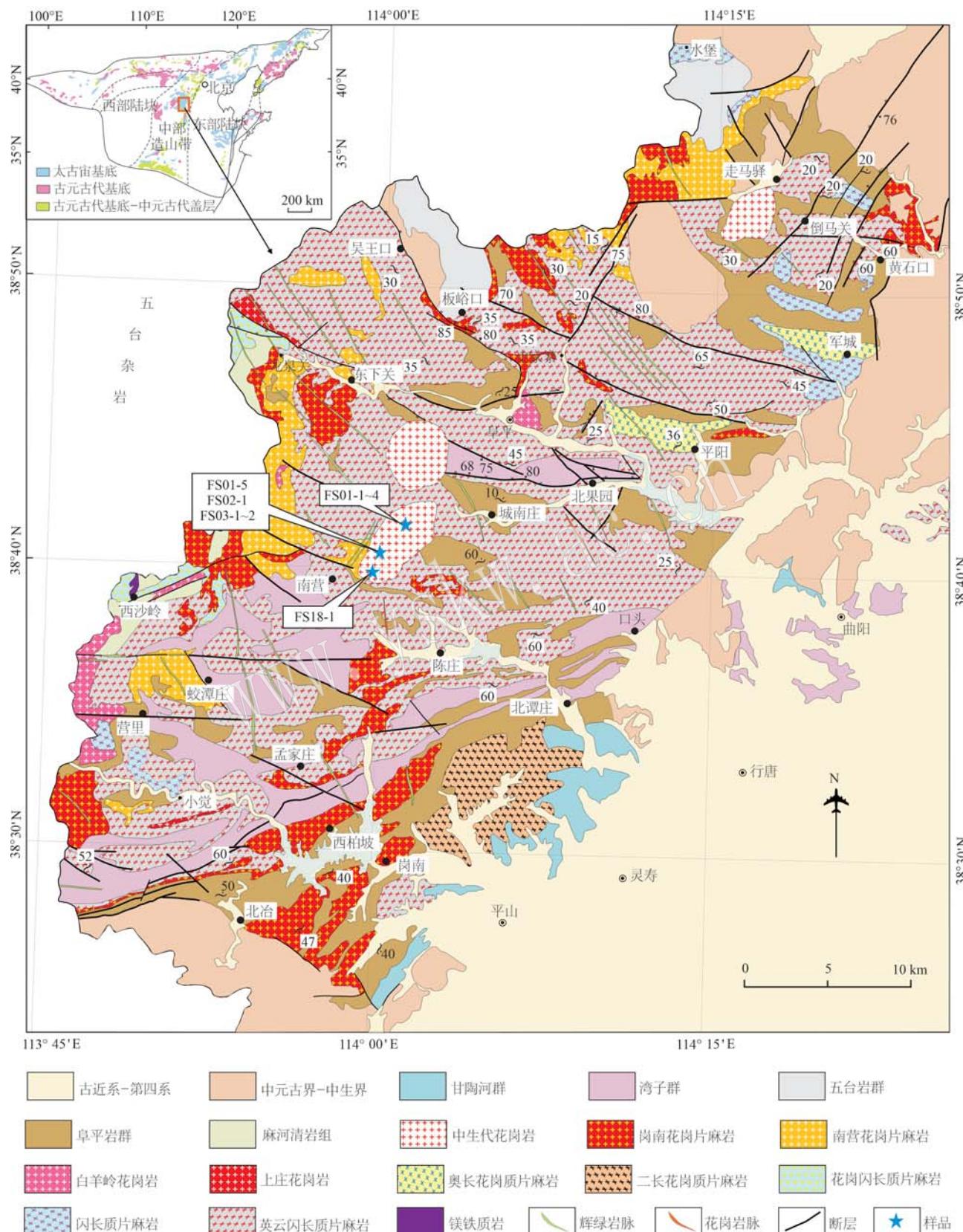
麻棚岩体位于华北克拉通中部太行山地区,其侵位于新太古代片麻岩和表壳岩之中。前人曾对麻棚岩体进行过岩石学、地球化学、年代学和岩体成因等多方面的研究。部分学者认为麻棚岩体是在早白垩世期间侵位的(王季亮等, 1994; 张亚雄等, 1994; 王启超等, 1995; 刘荣访, 2001; 夏国礼等, 2005, 2006; 王自力等, 2007; 刘阳等, 2010),属于I型花岗岩,物质来源较深,具壳幔混合特征(黄钦, 1990; 杨殿范等, 1991; 张亚雄等, 1994; 息朝庄

等, 2008; 刘小滨, 2009; 李林林等, 2012);还有一些学者认为中国东部中生代出露的部分中酸性高钾钙碱性岩石具有与埃达克岩十分相似的地球化学特征,称之为埃达克岩或埃达克质岩石,来自于下地壳的部分熔融(张旗等, 2001, 2003; 王焰等, 2001; 蔡剑辉等, 2003; 肖龙等, 2004; Xu et al., 2002; 焦守涛等, 2013; 张海东等, 2016);张萌萌(2020)的研究则认为麻棚岩体应称之为“高 Ba-Sr 花岗岩”,岩浆来自于富集地幔和下地壳的混合熔融。不同学者对麻棚岩体的研究结果表明,其花岗岩类型和岩浆源区的性质具有不同认识,还存在争议。

本文对麻棚岩体中的似斑状二长花岗岩、花岗闪长岩和石英闪长岩开展了岩石学、岩石地球化学、SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学以及 Lu-Hf 同位素研究工作,更深入地探讨了麻棚岩体的花岗岩类型和岩浆来源,以为揭示该期岩浆作用的动力学机制提供新证据。

1 地质概况

麻棚岩体位于太行山中北段阜平地区(图 1),区内阜平杂岩包括新太古代深成片麻岩和表壳岩、



古元古代二长花岗片麻岩和少量的钾长花岗岩(杜利林等, 2020)。麻棚岩体侵位于新太古代片麻岩和表壳岩中, 出露总面积约65 km², 具有较为明显的分带现象, 由中心向边缘, 有中心相粗粒似斑状二长花岗岩、过渡相粗粒花岗闪长岩和边缘相中细粒石英闪长岩3个相带, 不同相带之间没有明显界线, 指示其可能为同期岩浆活动形成(图3a), 各相带内普遍存在几厘米至几十厘米不等的暗色闪长质包体(门文辉等, 2014; 张萌萌, 2020), 岩体周围还发育中酸性脉岩及少量辉绿岩脉(李真真, 2009)。

2 样品描述与分析方法

2.1 样品采集

本次研究样品采自麻棚岩体中心相似斑状二长花岗岩(FS01-1、FS01-2、FS01-3、FS01-4)、过渡相花岗闪长岩(FS01-5、FS02-1、FS03-1、FS03-2)和边缘相石英闪长岩(FS18-1), 采样位置见图1、图2。本次工作对麻棚岩体的9件样品进行了主、微量元素分

析, 并选择3个不同相带的各1件代表性样品(FS01-1、FS03-2、FS18-1)进行了锆石SHRIMP U-Pb年代学和Lu-Hf同位素分析。

2.2 岩石学特征

似斑状二长花岗岩, 浅肉红色, 似斑状结构, 块状构造; 斑晶为钾长石(25%±)、斜长石(5%±), 粒径7~15 mm; 基质为2~4 mm的钾长石(5%±)、斜长石(30%±)、石英(30%±)及黑云母(<5%)、角闪石(<5%); 副矿物为磁铁矿、锆石、磷灰石、榍石等(图3a、3d)。

花岗闪长岩, 灰白色, 粗粒半自形结构, 块状构造; 由斜长石(45%±)、石英(20%±)、钾长石(15%±)、角闪石(10%±)、黑云母(5%±)组成, 粒径多为0.3~3 mm; 副矿物为磁铁矿、锆石、磷灰石、榍石等(图3b、3e)。

石英闪长岩, 灰白色, 中细粒半自形结构, 块状构造; 由斜长石(55%±)、钾长石(5%~10%)、石英(10%±)、黑云母(10%~15%)、角闪石(15%±)组成, 粒径多为0.2~2.5 mm; 副矿物主要为磁铁矿、锆石、磷灰石、榍石等(图3c、3f)。

2.3 分析方法

9件侵入岩样品的全岩粉末样品制备在河北省区域地质调查院实验室完成。选取300~500 g岩石样品, 去掉风化面后, 选取新鲜部分用颚式破碎机破碎, 然后用粉碎机样品碎块粉碎至200目以下, 后从中取50~100 g进行全岩化学分析。全岩主、微量元素分析在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。主量元素用X荧光光谱仪(XRF, Rigaku-2100)测定, 微量元素测试采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS, Thermo X-series), 分析精度和准确度优于5%。

样品FS01-1、FS03-2、FS18-1的锆石单矿物分选在河北省区域地质调查院实验室完成, 锆石U-Pb定年在北京离子探针中心采用SHRIMP II完成。详细分析方法见Williams(1998)。数据处理采用SQUID1.02及ISOPLOT软件, 详细分析流程和原理参考文献(Ludwig, 2001)。根据实测²⁰⁴Pb含量进行普通铅校正, 采用²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为锆石年龄(Black et al., 2003), 同位素比值和单点年龄误差均为1σ, 加权平均年龄误差为95%置信度。锆石Lu-Hf同位素分析在中国地质科学院矿产资源研究所MC-ICP-

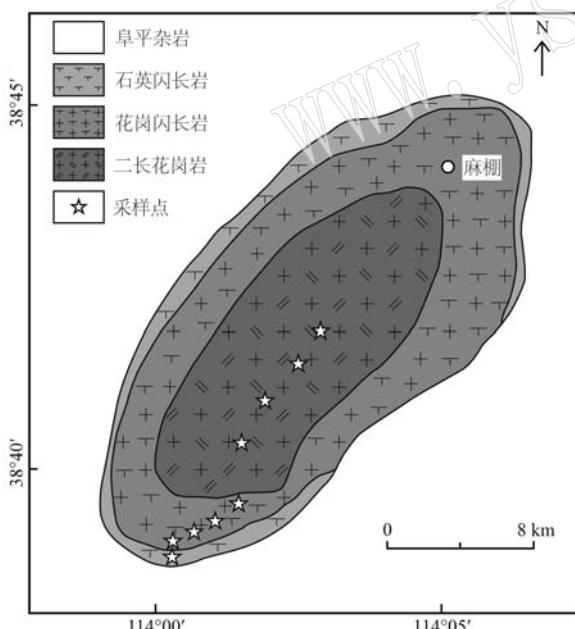


图2 麻棚岩体露头特征及地质简图(河北省地质局区域地质测量大队, 1966)^①

Fig. 2 The outcrop characteristics and geological sketch map of Mapeng pluton (Regional Geological Survey Brigade of Hebei Provincial Geological Bureau, 1966)^①

^① 河北省地质局区域地质测量大队. 1966. 1:20万阜平幅地质图.

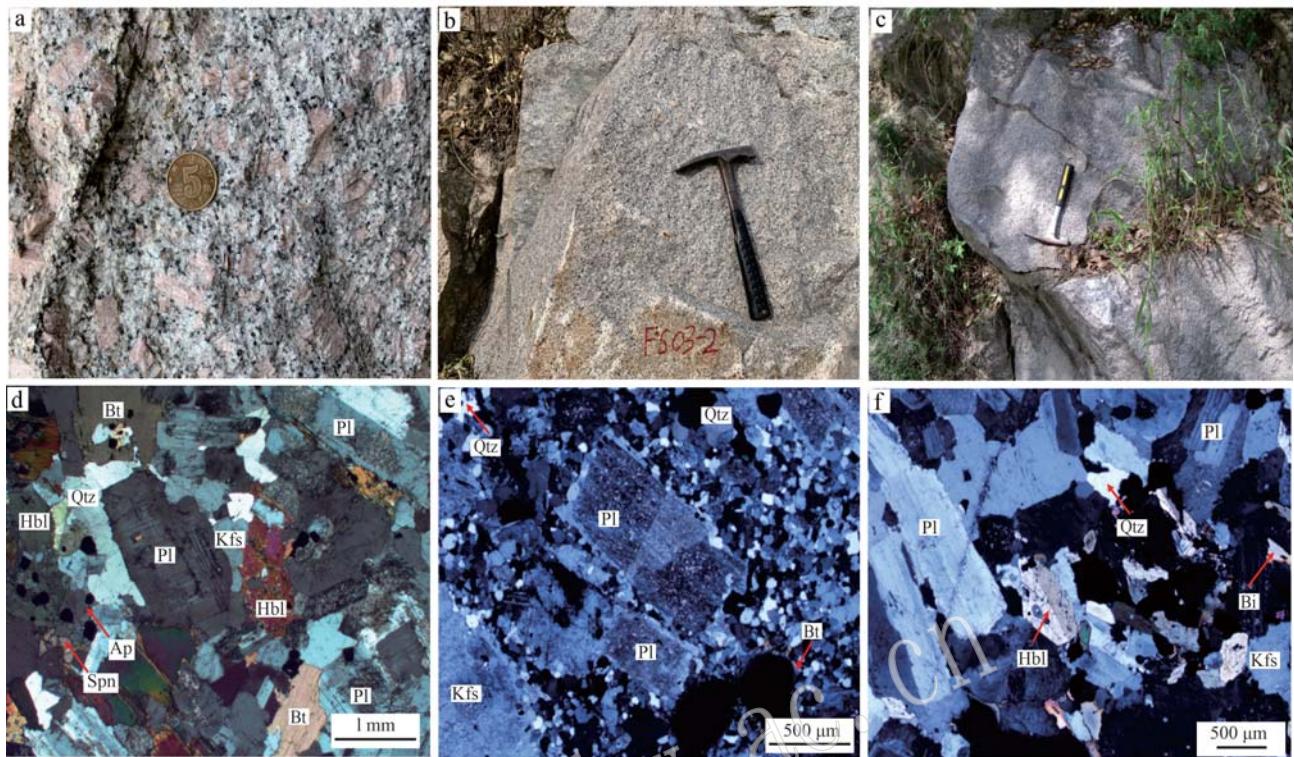


图3 麻棚岩体花岗质岩石宏观露头及镜下微观特征(正交偏光)

Fig. 3 Macroscopic and microscopic characteristics of granites from the Mapeng pluton (cross-polarized light)

Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Qtz—石英; Hbl—角闪石; Bt—黑云母; Ap—磷灰石; Spn—榍石
 Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Qtz—quartz; Hbl—hornblende; Bt—biotite; Ap—apatite; Spn—sphene

MS实验室完成,分析点与U-Pb定年分析点为同一位置。仪器运行条件、详细分析流程、数据校正方法及锆石标准参考值详见侯可军等(2007)。

3 分析结果

3.1 岩石地球化学

麻棚岩体的主量、微量及稀土元素分析结果列于表1。由表1中可以看出, SiO_2 含量变化范围较大(60.75%~71.42%), Al_2O_3 含量在14.34%~15.88%之间,里特曼指数 σ 值在2.36~3.17之间,碱度指数AR在2.07~3.54之间。由中心向边部, SiO_2 、 Na_2O 含量和岩石分异指数DI逐渐减小, FeO 、 MgO 、 P_2O_5 含量及岩石固结指数SI逐渐增大。样品岩石地球化学数据在TAS图解(图4)中,落入石英二长岩和花岗岩范围;铝饱和指数(A/CNK)=0.85~1.01,在 A/CNK - A/NK 图解(图5a)中落入准铝质区域;在 K_2O - SiO_2 图解(图5b)中,属于高钾钙碱性系列。

麻棚岩体的9件花岗岩样品都具有相似的稀土元素配分模式(图6a),岩石的轻、重稀土元素总量分别为 117.81×10^{-6} ~ 182.45×10^{-6} 和 5.03×10^{-6} ~ 9.94×10^{-6} 。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为4.14~6.26,表明轻稀土之间发生了分馏;而 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 为3.00~6.00,表明重稀土之间也发生了分馏。 δEu 为0.79~0.91,具有弱负铕异常;除了样品FS01-1的 δCe 为0.30之外,其余样品的 δCe 为0.89~0.97,平均0.86,显示弱负铈异常。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图6b),花岗岩样品的微量元素显示了富集大离子亲石元素(LILE),如K、Pb、Sr、Ba及轻稀土元素(LREE),其中 $\text{Sr} > 796 \times 10^{-6}$, $\text{Ba} > 978 \times 10^{-6}$,亏损Nb、Ta、P、Ti等高场强元素的特征。

3.2 锆石SHRIMP U-Pb同位素分析

样品FS01-1(似斑状二长花岗岩)、FS03-2(花岗闪长岩)、FS18-1(石英闪长岩)中的锆石晶形完整,多呈自形长柱状,晶体长轴一般为40~200 μm,长宽比1.5:1~3:1,多具清晰的震荡环带或板状环带结构(图7), Th/U 值为0.37~1.69(表2),具有典型的

表1 麻棚岩体花岗质岩石主量($w_B/\%$)、微量和稀土元素($w_B/10^{-6}$)组成Table 1 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) elements compositions of granites from the Mapeng pluton

岩性 样号	似斑状二长花岗岩				花岗闪长岩				石英闪长岩 FS18-1
	FS01-1	FS01-2	FS01-3	FS01-4	FS01-5	FS02-1	FS03-1	FS03-2	
SiO ₂	71.01	70.72	70.75	71.42	69.86	67.21	68.19	67.49	60.75
TiO ₂	0.34	0.34	0.38	0.34	0.33	0.45	0.45	0.43	0.62
Al ₂ O ₃	14.95	14.94	15.05	14.34	14.99	15.38	15.27	15.38	15.88
Fe ₂ O ₃	1.19	0.81	1.13	1.14	1.32	1.74	1.74	1.54	2.21
FeO	0.92	1.17	1.17	1.2	1.06	1.85	1.56	1.63	3.86
MnO	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.06	0.05	0.05	0.10
MgO	0.65	0.67	0.78	0.75	0.95	1.55	1.54	1.44	3.35
CaO	1.38	1.44	1.69	1.99	2.11	3.08	2.98	2.71	4.76
Na ₂ O	4.53	4.26	4.58	4.39	4.17	4.13	4.28	4.27	3.86
K ₂ O	4.46	4.91	4.29	3.8	4.33	4.08	3.88	4.54	3.35
P ₂ O ₅	0.14	0.14	0.17	0.15	0.13	0.18	0.19	0.19	0.22
LOI	0.53	0.43	0.43	0.51	0.69	0.55	0.41	0.42	0.54
TOTAL	101.05	101.03	101.63	101.27	101.04	102.11	102.1	101.72	99.46
TFeO	1.99	1.90	2.19	2.23	2.25	3.42	3.13	3.02	5.85
Na ₂ O+K ₂ O	8.99	9.17	8.87	8.19	8.50	8.21	8.16	8.81	7.21
Mg [#]	36.79	38.61	38.87	37.53	42.97	44.72	46.76	45.98	50.52
AR	3.45	3.54	3.25	3.01	2.98	2.60	2.62	2.90	2.07
DI	89.14	88.31	87.07	86.44	84.96	79.18	80.24	81.96	64.79
SI	5.53	5.67	6.53	6.65	8.03	11.61	11.85	10.73	20.14
σ	2.89	3.03	2.84	2.36	2.69	2.78	2.64	3.17	2.93
A/NK	1.22	1.21	1.23	1.26	1.30	1.37	1.36	1.29	1.59
A/CNK	1.01	1.00	0.99	0.96	0.97	0.91	0.92	0.91	0.85
La	42.9	27.3	31.7	29.8	41.1	32.9	38.6	47.8	41.7
Ce	73.2	56.3	59.3	54.9	69.2	65.7	76.2	86.2	76.9
Pr	7.57	6.73	6.80	6.21	7.28	7.56	9.11	9.60	8.60
Nd	24.0	24.0	24.3	22.1	23.6	27.2	32.2	32.3	32.1
Sm	4.31	4.15	4.06	3.88	4.15	5.00	5.38	5.29	5.45
Eu	0.95	0.97	0.98	0.92	0.93	1.23	1.21	1.26	1.46
Gd	2.53	2.50	2.55	2.41	2.75	3.42	3.40	3.46	4.02
Tb	0.26	0.27	0.27	0.25	0.31	0.42	0.37	0.34	0.47
Dy	1.13	1.18	1.23	1.20	1.48	2.06	1.76	1.70	2.30
Ho	0.16	0.18	0.19	0.18	0.24	0.36	0.31	0.28	0.41
Er	0.51	0.51	0.55	0.54	0.77	1.13	0.97	0.88	1.24
Tm	0.05	0.06	0.07	0.07	0.10	0.14	0.12	0.11	0.18
Yb	0.34	0.42	0.47	0.47	0.71	0.96	0.85	0.78	1.08
Lu	0.05	0.06	0.07	0.07	0.11	0.15	0.13	0.12	0.16
V	24.5	24.7	27.5	28.1	32.6	55.3	50.3	47.8	84.2
Cr	4.76	5.43	5.80	6.09	12.90	28.20	20.70	19.60	37.70
Co	3.31	3.27	3.66	3.77	4.43	7.69	7.40	6.06	7.76
Ni	2.16	2.31	2.69	2.70	4.69	7.62	7.85	6.55	7.98
Sc	2.45	2.54	2.97	3.11	3.68	6.56	5.44	5.87	6.87
Ga	21.4	22.0	21.2	20.6	19.1	19.7	19.5	20.6	21.1
Rb	102.0	136.0	92.6	90.2	88.5	82.0	62.3	78.2	76.2
Sr	827	878	805	799	796	949	987	854	988
Ba	1521	1377	1107	978	1347	1453	1659	1535	1532
Pb	16.6	15.1	16.7	17.3	19.7	19.5	16.2	14.2	13.9
Th	7.39	6.79	7.42	6.18	7.54	7.60	7.24	12.90	6.78
U	1.41	1.97	2.00	1.74	1.26	1.56	1.38	2.62	1.72
Nb	9.93	10.70	11.50	10.80	9.23	10.20	8.65	9.78	9.02
Ta	0.68	0.73	0.74	0.81	0.79	0.86	0.58	0.67	0.58
Zr	157	144	151	156	147	157	141	148	142
Hf	4.29	4.01	4.23	4.18	4.11	4.21	3.90	4.37	4.31
Y	5.05	5.65	5.82	6.06	7.89	11.20	9.26	8.52	11.82
ΣREE	157.96	124.63	132.54	123.00	152.73	148.23	170.61	190.12	176.03
LREE	152.93	119.45	127.14	117.81	146.26	139.59	162.70	182.45	166.09
HREE	5.03	5.18	5.40	5.19	6.47	8.64	7.91	7.67	9.94
LREE/HREE	30.40	23.06	23.54	22.70	22.61	16.16	20.57	23.79	16.71
La/Yb	126.18	65.00	67.45	63.40	57.89	34.27	45.41	61.28	38.57
δ Eu	0.81	0.85	0.87	0.86	0.79	0.86	0.81	0.85	0.91
δ Ce	0.30	0.97	0.93	0.92	0.89	0.97	0.95	0.92	0.93
(La/Yb) _N	85.07	43.82	45.47	42.75	39.03	23.11	30.62	41.32	26.01
(La/Sm) _N	6.26	4.14	4.91	4.83	6.23	4.14	4.51	5.68	4.81
(Gd/Yb) _N	6.00	4.80	4.38	4.14	3.13	2.87	3.23	3.58	3.00

里特曼组合指数 σ 或里特曼指数 $\sigma = (K_2O + Na_2O)^2 / (SiO_2 - 43)$, $\sigma < 3.3$ 者称为钙碱性岩, $\sigma = 3.3 \sim 9$ 者为碱性岩, $\sigma > 9$ 者为过碱性岩;
 $A/NK = Al_2O_3 / 102 / (Na_2O / 62 + K_2O / 94)$; $A/CNK = Al_2O_3 / 102 / (CaO / 56 + Na_2O / 62 + K_2O / 94)$, $AR = (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O) / (Al_2O_3 + CaO - Na_2O - K_2O)$ 。

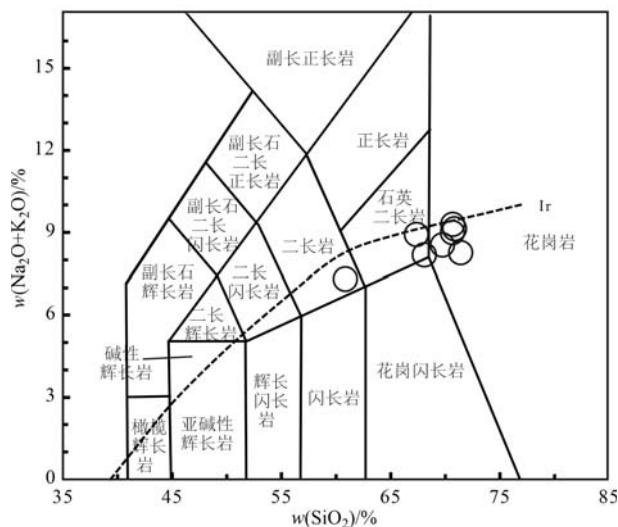


图 4 麻棚岩体花岗质岩石 TAS 图解(据 Middlemost, 1994)

Fig. 4 TAS diagram of the Mapeng granitoids (after Middlemost, 1994)

岩浆锆石特征(简平等, 2001)。个别锆石内部存在小的不规则晶核, 可能为捕获或继承锆石(李瑞保等, 2009)。

本次工作对 FS01-1(似斑状二长花岗岩)、FS03-2(花岗闪长岩)、FS18-1(石英闪长岩)中共 43 个锆石进行了 SHRIMP U-Pb 同位素分析, 分析结果见表 2。似斑状二长花岗岩样品 FS01-1 的 15 个锆石表面年龄为 $133.1 \pm 1.9 \sim 125.3 \pm 1.7$ Ma, 在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图上均投影在谐和线上或谐和线附近(图 7a), 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 129.4 ± 1.4 Ma(MSWD = 2.6, 2σ ; 图 6a), 代表似斑状二长花岗岩的结晶年龄。

花岗闪长岩样品 FS03-2 的 11 个锆石表面年龄为 $138.3 \pm 2.2 \sim 127.5 \pm 2.1$ Ma, 其中 10 个点在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图上投影在谐和线上(图 7b), 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 131.2 ± 2.2 Ma(MSWD =

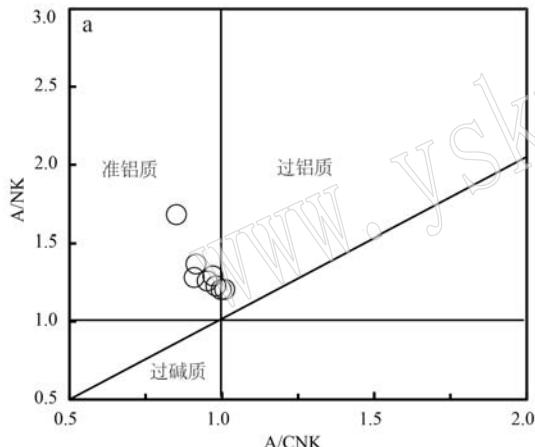
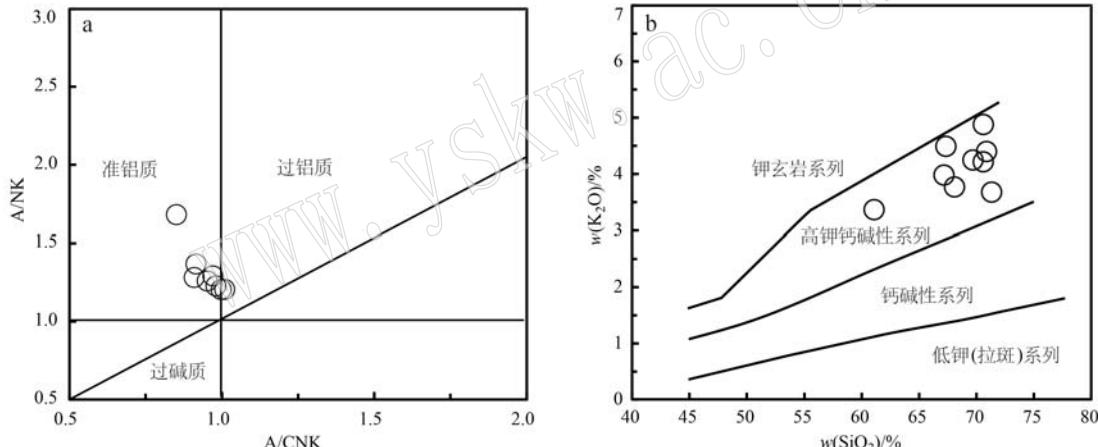


图 5 麻棚岩体 A/NK-A/CNK 图解(a)(据 Middlemost, 1994)

Fig. 5 A/NK-A/CNK diagram(a, after Middlemost, 1994) and $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(b)(据 Morrison, 1980) of Mapeng granites

3.3 Lu-Hf 同位素组成

麻棚岩体样品 FS01-1、FS03-2、FS18-1 中已完成 U-Pb 测年的 41 颗岩浆锆石(剔除 2 颗基底锆石: FS03-2.9、FS03-2.10)的 Hf 同位素测定分析结果列于表 3。所有测试点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 0.000 003 ~ 0.001 225 之间, 远小于 0.002, 说明锆石在岩体形成之后漫长的演化历程中具有较低的放射成因 Hf 积累, 因而可以用锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值探索岩体形成时的成因信息(Stille and Steiger, 1991; 吴福元等, 2007)。此外, 41 个测试点的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值为 -0.99 ~ -0.96, 明显小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值(-0.34, Amelin



$1.9, 2\sigma$; 图 7b), 代表花岗闪长岩的结晶年龄; 另外 2 个锆石测试点(FS03-2.9、FS03-2.10)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1767 ± 36 和 1877 ± 28 Ma(大于 1.0 Ga 锆石样品点选用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄), 应是捕获或继承的基底岩石中锆石的年龄。

石英闪长岩样品 FS18-1 的 15 个锆石表面年龄为 $143.3 \pm 6.9 \sim 123.9 \pm 5.1$ Ma, 在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图上投影在谐和线上或谐和线附近(图 7c), 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 129.5 ± 1.3 Ma(MSWD = 1.5, 2σ ; 图 7c), 代表石英闪长岩的结晶年龄。

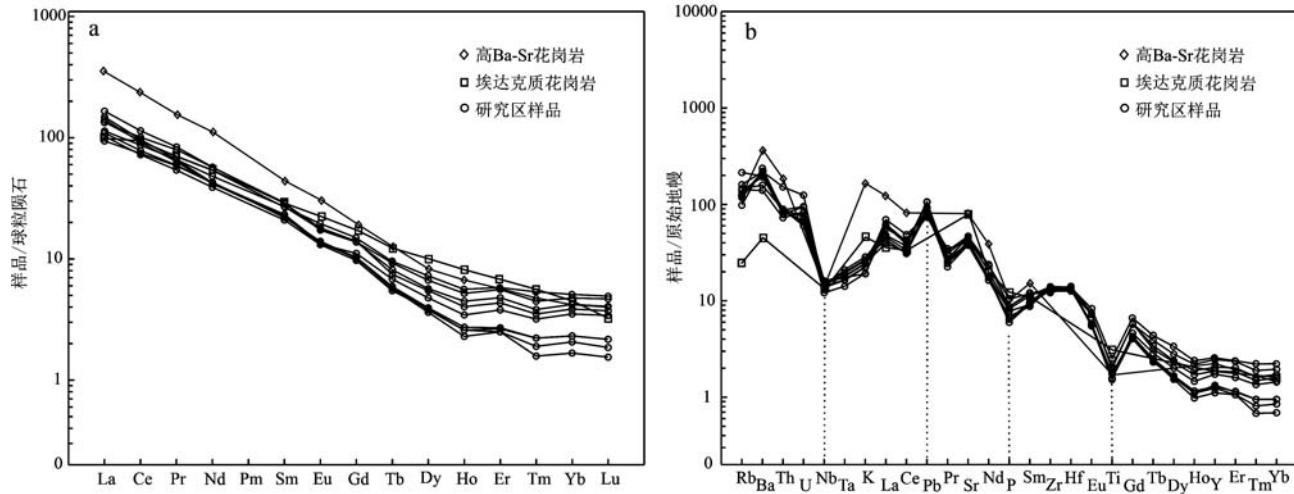


图 6 麻棚岩体球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagram (b) of the Mapeng granitoids (normalization values after Sun and McDonough, 1989)
高 Ba-Sr 花岗岩和埃达克岩分别引自 Fowler et al., 2008; Martin, 1999
The data for high Ba-Sr granitoids and adakitic granitoids are from Fowler et al., 2008; Martin, 1999, respectively

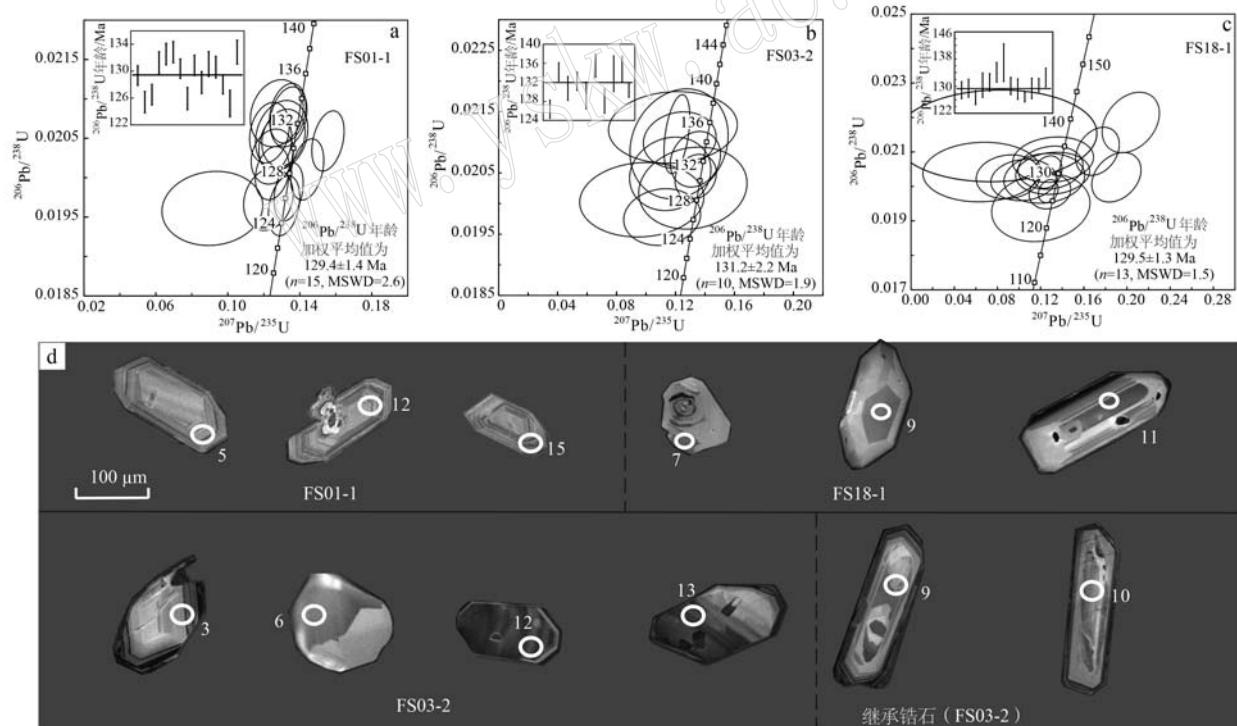


图 7 麻棚岩体花岗质岩石锆石 U-Pb 年龄谐和图(a~c)和代表性锆石阴极发光图像(d)

Fig. 7 Zircon U-Pb concordia diagrams (a~c) and representative CL images (d) of zircons for the Mapeng granitoids

et al., 2000) 和硅铝质地壳 $f_{\text{La/Hf}}$ 值 (-0.72, Vervoort *et al.*, 1996), 所以, 其二阶段模式年龄更能反映源区物质在地壳的平均存留年龄或源区物质从亏损地幔被抽取的时间。

麻棚岩体花岗岩样品 FS01-1、FS03-2、FS18-1 中

41 颗岩浆锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 0.281~0.821~0.282~0.254 之间(表 3), 平均值为 0.282~0.151; 对应的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值介于 -27.00~-15.44 之间, 平均值为 -19.09; 亏损地幔二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 2~358~1~765 Ma, 平均值为 1~950 Ma(图 8)。

表 2 麻棚岩体花岗质岩锆石 SHRIMP-U-Pb 年代学分析测试结果
Table 2 SHRIMP U-Pb isotopic analytical data of granites from the Mapeng pluton

样品点	$w_{\text{B}}/\%$		$w_{\text{B}}/10^{-6}$		Th/U		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		1 σ		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		1 σ		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		1 σ		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		1 σ		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		1 σ		同位素年龄/Ma		不谐和度/%	
	$^{206}\text{Pb}_c$	U	$^{206}\text{Pb}^*$	$^{206}\text{Pb}^*$	1 σ	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ	同位素年龄/Ma	不谐和度/%									
F001-1(似斑状二长花岗岩)																														
1	0.72	509	264	8.92	0.54	0.049 0	3.1	0.137 8	3.3	0.020 38	1.1	130.1	± 1.6	-76	± 150	121.5	± 5.5	271												
2	0.00	274	106	4.63	0.40	0.048 1	4.2	0.130 1	4.4	0.019 63	1.3	125.3	± 1.7	122	± 99	126.4	± 5.0	-3												
3	0.00	329	117	5.60	0.37	0.049 0	3.8	0.134 0	4.0	0.019 82	1.2	126.5	± 1.6	146	± 90	126.3	± 4.7	13												
4	0.73	326	142	5.80	0.45	0.049 1	3.8	0.140 3	4.0	0.020 72	1.2	132.2	± 1.7	-144	± 140	118.7	± 5.8	191												
5	0.25	332	123	5.94	0.38	0.047 9	3.9	0.137 5	4.0	0.020 81	1.2	132.7	± 1.7	34	± 120	129.3	± 6.0	-287												
6	0.24	337	133	6.05	0.41	0.050 7	3.6	0.146 4	3.8	0.020 93	1.2	133.5	± 1.7	20	± 120	122.2	± 5.6	-557												
7	0.69	457	234	8.07	0.53	0.048 6	3.3	0.137 6	3.4	0.020 53	1.1	131.0	± 1.6	-62	± 110	123.5	± 4.3	309												
8	0.83	281	106	4.81	0.39	0.050 4	4.2	0.138 1	4.4	0.019 86	1.3	126.8	± 1.7	-53	± 180	112.6	± 8.0	338												
9	0.48	429	216	7.59	0.52	0.050 7	3.2	0.144 1	3.4	0.020 62	1.1	131.6	± 1.6	13	± 140	122.6	± 5.7	-873												
10	0.00	286	107	4.94	0.39	0.054 5	3.8	0.151 5	4.0	0.020 17	1.3	128.7	± 1.7	285	± 92	121.9	± 4.9	55												
11	0.92	201	72	3.57	0.37	0.053 7	4.6	0.153 6	4.8	0.020 74	1.4	132.3	± 2.0	-9	± 180	109.7	± 8.3	1639												
12	-	314	151	5.51	0.50	0.052 6	3.8	0.147 9	4.0	0.020 40	1.2	130.2	± 1.8	419	± 80	135.7	± 4.7	69												
13	0.31	511	370	8.83	0.75	0.049 9	2.9	0.138 8	3.1	0.020 18	1.1	128.8	± 1.6	-51	± 120	122.1	± 3.6	353												
14	2.25	218	74	3.75	0.35	0.049 0	4.9	0.135 1	5.1	0.019 99	1.4	127.6	± 1.9	-806	± 570	84	± 19	116												
15	0.48	353	184	6.34	0.54	0.046 2	3.7	0.133 1	3.9	0.020 87	1.3	133.1	± 1.9	-92	± 180	129.4	± 7.1	244												
F003-2(花岗闪长岩)																														
1	3.58	201	153	3.98	0.79	0.053 0	48	0.153 0	48	0.020 74	1.4	132.2	± 4.7	1794	± 420	215	± 27	92												
2	1.43	234	194	4.04	0.86	0.048 2	4.8	0.132 7	5.0	0.019 97	1.4	127.5	± 2.1	-308	± 400	118.5	± 8.0	141												
3	1.22	258	260	4.73	1.04	0.052 0	4.1	0.152 5	4.3	0.021 29	1.3	135.8	± 2.2	-205	± 330	125.7	± 6.4	166												
4	1.06	99	28	1.77	0.29	0.046 3	8.4	0.132 0	8.6	0.020 62	1.8	131.5	± 2.6	-274	± 390	113	± 21	148												
5	0.51	150	54	2.69	0.37	0.050 4	5.5	0.144 7	5.6	0.020 82	1.4	132.8	± 2.0	35	± 200	122	± 10	-279												
6	1.35	60	93	1.07	1.59	0.050 9	9.2	0.143 0	9.5	0.020 35	2.0	129.9	± 3.9	59	± 440	127.5	± 7.5	-120												
7	2.18	142	70	2.66	0.51	0.056 5	6.8	0.169 0	6.9	0.021 68	1.4	138.3	± 2.2	-327	± 620	103	± 20	142												
8	2.37	102	98	1.80	0.99	0.056 4	6.2	0.160 0	6.4	0.020 60	1.6	131.5	± 2.7	-700	± 790	109	± 11	118												
9	0.69	59	20	17.9	0.35	0.116 9	1.5	5.680 0	2.7	0.352 20	2.2	1.944	± 40	1767	± 36	1486	± 160	-9												

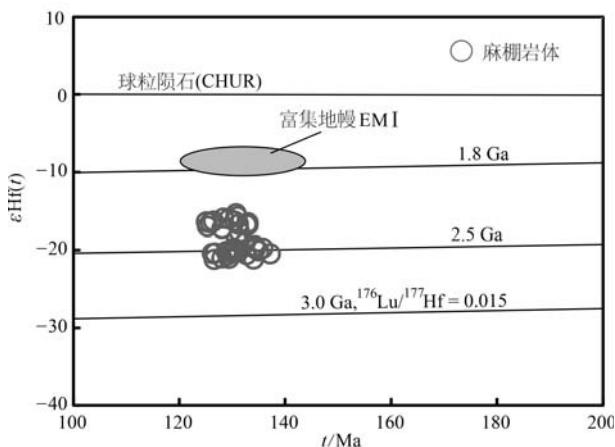
续表 2
Continued Table 2

样点	$w_{\text{B}}/\%$			$w_{\text{B}}/10^{-6}$			同位素比值			同位素年龄/Ma								
	$^{206}\text{Pb}_{\text{e}}$	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	Th/U	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	1σ	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 1\sigma$	不谐和度/%
10	0.41	92	80	27.2	0.90	0.1163	1.2	5.5370	1.7	0.34530	1.3	1.913	± 24	1.877	± 28	1.883	± 41	-2
11	1.94	69	68	1.28	1.02	0.0606	7.2	0.1790	7.7	0.02146	2.7	136.9	± 4.6	-207	± 450	117.1	± 9.8	165
12	0.70	415	397	7.59	0.99	0.0469	3.3	0.1375	3.9	0.02128	2.0	135.7	± 3.3	-256	± 110	129.8	± 3.9	153
13	0.50	326	255	5.75	0.81	0.0494	3.8	0.1397	4.0	0.02049	1.1	130.7	± 1.8	71	± 160	128.1	± 4.8	-83
FS18-1(石英闪长岩)																		
1	3.30	73	110	1.31	1.55	0.0643	5.7	0.1850	6.0	0.02088	1.8	133.2	± 3.6	-526	± 510	114.8	± 6.4	125
2	3.33	62	99	1.11	1.66	0.0590	6.5	0.1710	6.7	0.02097	1.9	133.8	± 4.0	-942	± 640	116.6	± 6.4	114
3	1.18	115	165	1.99	1.48	0.0642	4.3	0.1795	4.5	0.02027	1.6	129.4	± 2.9	51	± 230	117.2	± 4.9	-148
4	-	32	41	0.592	1.33	0.0566	9.9	0.1680	10	0.02155	2.6	137.5	± 5.4	854	± 170	147	± 11	84
FS01-1(似斑状二长花岗岩)																		
5	4.89	37	36	0.686	1.01	0.0586	8.5	0.1720	8.9	0.02134	2.4	136.1	± 4.2	-2020	± 2100	99	± 14	106
6	1.14	69	106	1.23	1.59	0.0722	4.7	0.2120	5.0	0.02124	1.9	135.5	± 3.7	-23	± 370	117.2	± 6.5	682
7	0.00	46	72	0.825	1.64	0.0603	7.3	0.1750	7.6	0.02104	2.2	134.2	± 4.5	589	± 160	133.7	± 6.8	77
8	4.24	44	71	0.855	1.66	0.0632	7.0	0.1960	7.7	0.02247	3.3	143.3	± 6.9	-1550	± 2600	118	± 15	109
9	1.97	81	124	1.44	1.60	0.0561	6.1	0.1590	6.4	0.02063	1.8	131.6	± 3.5	33	± 410	125.4	± 6.9	-298
10	2.32	48	78	0.851	1.69	0.0518	8.6	0.1460	8.9	0.02043	2.2	130.4	± 4.5	-96	± 490	125.7	± 7.8	234
11	0.28	481	373	8.23	0.80	0.0427	3.3	0.1164	3.5	0.01977	1.1	126.2	± 1.6	19	± 110	131.0	± 3.8	-563
12	0.00	41	54	0.711	1.37	0.0443	12	0.1200	12	0.01968	2.3	125.6	± 4.4	871	± 160	143.7	± 8.1	85
13	1.90	43	48	0.728	1.17	0.0455	10	0.1220	11	0.01941	3.1	123.9	± 5.1	-57	± 600	123	± 12	316
14	1.31	123	161	2.19	1.35	0.0565	4.7	0.1615	4.9	0.02072	1.5	132.2	± 2.8	-62	± 170	123.0	± 4.5	310
15	0.41	71	113	1.28	1.63	0.0427	7.8	0.1218	8.0	0.02070	1.8	132.0	± 3.7	-5	± 450	134.2	± 7.6	2643

注: $\text{Pb}_{\text{e}}, \text{Pb}^*$ 分别为普通铅和放射成因铅, 普通铅采用实测的 ^{204}Pb 校正。

表 3 麻棚岩体花岗质岩石锆石 Hf 同位素特征
Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of granitoids from the Mapeng pluton

样号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$(^{176}\text{HF}/^{177}\text{HF})_i$	$\pm 2\sigma$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(\text{t})$	t_{DM}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
FS01-1-1	129.4	0.013 244	0.000 095	0.000 526	0.000 004	0.282 237	0.000 009	0.282 235	-18.9	-16.14	1 414	1 800	-0.98	
FS01-1-2	125.4	0.011 990	0.000 293	0.000 458	0.000 010	0.282 212	0.000 009	0.282 211	-19.8	-17.09	1 445	1 845	-0.99	
FS01-1-3	126.5	0.011 253	0.000 055	0.000 437	0.000 002	0.282 231	0.000 009	0.282 230	-19.1	-16.41	1 419	1 811	-0.99	
FS01-1-4	131.3	0.007 346	0.000 263	0.000 301	0.000 009	0.282 188	0.000 010	0.282 188	-20.6	-17.79	1 472	1 885	-0.99	
FS01-1-5	132.5	0.011 429	0.000 223	0.000 464	0.000 009	0.282 215	0.000 010	0.282 214	-19.7	-16.83	1 442	1 837	-0.99	
FS01-1-6	132.8	0.012 690	0.000 138	0.000 483	0.000 005	0.282 213	0.000 009	0.282 212	-19.8	-16.89	1 445	1 840	-0.99	
FS01-1-7	130.4	0.012 486	0.000 146	0.000 469	0.000 004	0.282 228	0.000 009	0.282 227	-19.2	-16.41	1 424	1 815	-0.99	
FS01-1-8	125.9	0.013 269	0.000 252	0.000 503	0.000 010	0.282 226	0.000 009	0.282 225	-19.3	-16.58	1 428	1 820	-0.98	
FS01-1-9	130.9	0.018 859	0.000 111	0.000 712	0.000 003	0.282 245	0.000 009	0.282 243	-18.6	-15.83	1 410	1 785	-0.98	
FS01-1-10	128.3	0.012 311	0.000 167	0.000 481	0.000 004	0.282 240	0.000 010	0.282 239	-18.8	-16.03	1 407	1 793	-0.99	
FS01-1-11	131.1	0.013 754	0.000 087	0.000 538	0.000 005	0.282 217	0.000 009	0.282 215	-19.6	-16.81	1 442	1 835	-0.98	
FS01-1-12	130.6	0.019 350	0.000 273	0.000 672	0.000 007	0.282 256	0.000 010	0.282 254	-18.2	-15.44	1 393	1 765	-0.98	
FS01-1-13	128.0	0.017 589	0.000 180	0.000 656	0.000 006	0.282 204	0.000 010	0.282 203	-20.1	-17.32	1 464	1 858	-0.98	
FS01-1-14	125.2	0.009 544	0.000 075	0.000 385	0.000 004	0.282 228	0.000 010	0.282 227	-19.2	-16.53	1 421	1 816	-0.99	
FS01-1-15	132.8	0.012 111	0.000 169	0.000 475	0.000 004	0.282 221	0.000 010	0.282 220	-19.5	-16.62	1 434	1 827	-0.99	
FS03-2-1	142.0	0.015 969	0.000 273	0.000 492	0.000 009	0.281 922	0.000 021	0.281 921	-30.1	-27.00	1 845	2 358	-0.99	
FS03-2-2	126.3	0.032 685	0.000 779	0.001 057	0.000 029	0.282 116	0.000 010	0.282 113	-23.2	-20.53	1 603	2 019	-0.97	
FS03-2-3	134.2	0.019 428	0.000 122	0.000 578	0.000 005	0.282 126	0.000 010	0.282 125	-22.8	-19.94	1 568	1 996	-0.98	
FS03-2-4	130.7	0.013 615	0.000 206	0.000 514	0.000 007	0.282 161	0.000 009	0.282 160	-21.6	-18.79	1 518	1 935	-0.98	
FS03-2-5	132.2	0.011 852	0.000 211	0.000 446	0.000 006	0.282 147	0.000 009	0.282 146	-22.1	-19.24	1 534	1 959	-0.99	
FS03-2-6	129.2	0.023 256	0.000 135	0.000 687	0.000 002	0.282 120	0.000 010	0.282 118	-23.1	-20.30	1 582	2 010	-0.98	
FS03-2-7	135.5	0.017 980	0.000 120	0.000 610	0.000 004	0.282 128	0.000 010	0.282 126	-22.8	-19.88	1 568	1 993	-0.98	
FS03-2-8	128.0	0.035 814	0.000 679	0.001 109	0.000 020	0.282 098	0.000 011	0.282 095	-23.8	-21.12	1 630	2 050	-0.97	
FS03-2-11	133.8	0.042 070	0.002 237	0.001 225	0.000 061	0.282 091	0.000 011	0.282 088	-24.1	-21.24	1 644	2 061	-0.96	
FS03-2-12	134.8	0.016 624	0.001 079	0.000 499	0.000 029	0.282 118	0.000 010	0.282 117	-23.1	-20.22	1 576	2 010	-0.98	
FS03-2-13	130.4	0.009 723	0.000 413	0.000 303	0.000 013	0.282 126	0.000 010	0.282 125	-22.9	-20.03	1 558	1 997	-0.99	
FS18-1-1	128.8	0.017 086	0.000 381	0.000 552	0.000 009	0.282 119	0.000 010	0.282 117	-23.1	-20.33	1 577	2 011	-0.98	
FS18-1-2	129.4	0.020 357	0.000 452	0.000 656	0.000 015	0.282 121	0.000 010	0.282 119	-23.0	-20.25	1 579	2 007	-0.98	
FS18-1-3	126.6	0.020 200	0.001 049	0.000 693	0.000 036	0.282 093	0.000 011	0.282 091	-24.0	-21.30	1 619	2 058	-0.98	
FS18-1-4	139.4	0.014 569	0.000 093	0.000 491	0.000 003	0.282 124	0.000 010	0.282 122	-22.9	-19.92	1 568	1 999	-0.99	
FS18-1-5	130.3	0.010 232	0.000 122	0.000 330	0.000 003	0.282 130	0.000 010	0.282 129	-22.7	-19.88	1 553	1 990	-0.99	
FS18-1-6	131.1	0.016 604	0.000 526	0.000 535	0.000 014	0.282 120	0.000 010	0.282 119	-23.1	-20.24	1 575	2 008	-0.98	
FS18-1-7	134.1	0.016 045	0.000 363	0.000 529	0.000 010	0.282 136	0.000 010	0.282 135	-22.5	-19.58	1 552	1 978	-0.98	
FS18-1-8	136.9	0.021 811	0.000 371	0.000 722	0.000 014	0.282 107	0.000 010	0.282 105	-23.5	-20.59	1 601	2 031	-0.98	
FS18-1-9	130.1	0.016 704	0.000 442	0.000 546	0.000 012	0.282 121	0.000 010	0.282 120	-23.0	-20.21	1 574	2 006	-0.98	
FS18-1-10	129.1	0.024 198	0.000 435	0.000 762	0.000 011	0.282 108	0.000 010	0.282 106	-23.5	-20.74	1 602	2 032	-0.98	
FS18-1-11	126.8	0.025 372	0.000 414	0.000 842	0.000 012	0.282 116	0.000 010	0.282 114	-23.2	-20.48	1 593	2 017	-0.97	
FS18-1-12	129.3	0.017 697	0.000 088	0.000 584	0.000 004	0.282 095	0.000 010	0.282 094	-23.9	-21.16	1 611	2 053	-0.98	
FS18-1-13	123.8	0.014 241	0.000 062	0.000 485	0.000 002	0.282 135	0.000 010	0.282 134	-22.5	-19.86	1 553	1 984	-0.99	
FS18-1-14	130.3	0.014 740	0.000 309	0.000 492	0.000 008	0.282 117	0.000 011	0.282 116	-23.2	-20.36	1 578	2 014	-0.99	
FS18-1-15	132.6	0.022 457	0.000 327	0.000 720	0.000 008	0.282 106	0.000 010	0.282 105	-23.5	-20.70	1 601	2 032	-0.98	

图 8 锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ - t 图解Fig. 8 Zircon $\varepsilon\text{Hf}(t)$ - t diagram

4 讨论

4.1 形成时代

本研究选取麻棚岩体由中心至边缘 3 个不同相带的似斑状二长花岗岩、花岗闪长岩和石英闪长岩进行锆石定年，新获得的 SHRIMP U-Pb 年龄为 129.4 ± 1.4 、 131.2 ± 2.2 、 129.5 ± 1.3 Ma，代表了麻棚岩体的侵位时间，与前人获得的麻棚花岗岩 $130 \sim 125$ Ma 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄比较接近（李林林等，2012；Li *et al.*, 2013；张萌萌，2020）。本研究认为麻棚岩体不同类型、不同相带的花岗质岩石的形成年龄在误差范围内基本一致，为同一期岩浆活动，同时反映了其经历了快速的侵位和冷却结晶过程。

4.2 岩浆源区

麻棚岩体具有较高的全碱含量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.21\% \sim 9.17\%$) 和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值 ($0.87 \sim 1.15$)、低的 MgO 含量 ($0.65\% \sim 3.35\%$) 和 $\text{Mg}^\#$ 值 ($36.79 \sim 46.76$)、较低的 Al_2O_3 含量 ($14.34\% \sim 15.88\%$) 以及较为平坦的 HREE 分布模式（图 6a）。以上特征与典型的埃达克岩明显不同，典型的埃达克岩 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值仅为 0.42， MgO 含量 $< 3\%$ ， Al_2O_3 含量 $\geq 15\%$ （Defant *et al.*, 1991；Sajona *et al.*, 1993；Morris, 1995；Drummond and Defant, 1996；Stern and Kilian, 1996；Aguillón-Robles *et al.*, 2001）；典型埃达克岩的 $\text{Mg}^\#$ 平均值为 51，最高可达 68（葛晓月，2002）。

在 Na-K-Ca 图解上，麻棚岩体主要为钙碱性演化趋势，也不同于埃达克岩的奥长花岗岩演化趋势（图 9a）。在 Rb-Sr-Ba 图解中（Tarney and Jones, 1994；钱青等，2002），麻棚花岗质岩石的 9 个样品均分布于高 Ba-Sr 花岗岩区域（图 9b），明显不同于低 Ba-Sr 花岗岩的相对高 Rb 和低 Ba、Sr 含量的特征。此外，麻棚岩体具有高 Ba ($> 978 \times 10^{-6}$)、Sr ($> 796 \times 10^{-6}$) 和 LREE ($> 117.81 \times 10^{-6}$)，低 Rb ($< 136 \times 10^{-6}$)、Nb ($< 11.5 \times 10^{-6}$)、Ta ($< 0.86 \times 10^{-6}$)、Th ($< 12.9 \times 10^{-6}$)、U ($< 2.62 \times 10^{-6}$)、Y ($< 11.82 \times 10^{-6}$) 和 HREE ($< 9.94 \times 10^{-6}$)（表 1），没有明显的 Eu 异常，而且在原始地幔标准化微量元素蛛网图上明显亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素（图 5b）。此外， $(\text{La/Yb})_n = 23.11 \sim 85.07$ ，说明轻、重稀土元素分馏明显。上述特征显示出典型的高 Ba-Sr 花岗岩所具有的地球化学特征（Fowler *et al.*, 2001；Ye *et al.*, 2008；

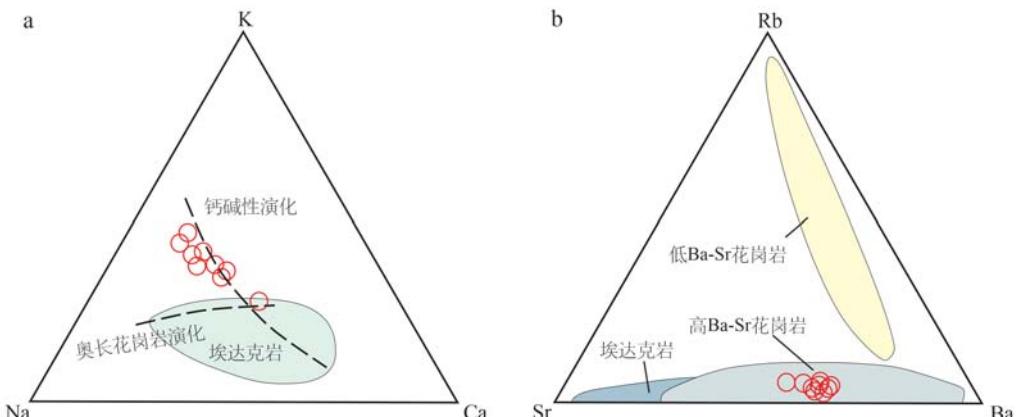


图 9 麻棚岩体花岗质岩石 Na-K-Ca(a) 和 Sr-Rb-Ba(b) 图解（据 Tarney and Jones, 1994）

Fig. 9 Na-K-Ca diagram (a) and Sr-Rb-Ba diagram (b) (after Tarney and Jones, 1994) for the Mapeng granitoids

Peng *et al.*, 2013)。因此,本研究认为麻棚岩体为高 Ba-Sr 花岗岩。

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析是一种可以详细记录岩浆混合和分异过程中同位素的组成变化、示踪岩浆源区的重要手段(吴福元等, 2007; Bouvier *et al.*, 2008; 周振华等, 2014)。花岗岩锆石的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值代表了岩浆源区的成分特征, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 正值通常代表花岗岩岩浆源区为亏损地幔或从亏损地幔中新增生的年轻地壳(隋振民等, 2009), $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 负值通常代表花岗岩岩浆源区为古老地壳(吴福元等, 2007)。麻棚岩体样品中 41 个岩浆锆石的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-27.00 \sim -15.44$, 二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 $2358 \sim 1765$ Ma, 在 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ -锆石 U-Pb 年龄图解(图 9)中, 所有数据点均投在球粒陨石演化线之下的壳源区域, 说明麻棚岩体的岩浆有古老地壳部分熔融的贡献。

高 Ba-Sr 花岗岩由 Tarney 和 Jones (1994) 提出, 与传统分类中的 I 型、S 型和 A 型花岗岩相比, 高 Ba-Sr 花岗质岩石具有高 Ba、Sr, 低 Rb、Y、HREE, 高 Sr/Y、K/Rb, 无显著 Eu 负异常等一系列微量元素地球化学特征。高 Ba-Sr 花岗岩蕴涵着丰富的大陆动力学信息, 是揭示地壳演化及壳幔作用的有力窗口(Fowler *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2018)。近年来, 我国东部越来越多的高 Ba-Sr 花岗岩逐渐被识别, 如胶东三佛山岩体、胶西北新城岩体、八达岭岩体、老山和狐偃山岩体等。关于高 Ba-Sr 花岗岩的成因具有多解性, 主要机制有: ① 加厚下地壳熔融(Choi *et al.*, 2009); ② 俯冲洋岛/大洋板片熔融(Tarney and Jones, 1994); ③ 交代岩石圈地幔熔融(Tarney and Jones, 1994); ④ 富集岩石圈地幔派生的钾玄质岩石分离结晶(Fowler *et al.*, 2001)。尽管存在争议, 不过大部分学者认为高 Ba-Sr 花岗岩源区有幔源物质参与, 并且微量元素特征继承自富集地幔组分(Fowler *et al.*, 2001; Pilet *et al.*, 2004; Ye *et al.*, 2008; Choi *et al.*, 2009; 王中亮等, 2014)。加厚下地壳和俯冲大洋板片熔融会产生埃达克质岩浆(Defant and Drummond, 1990), 而麻棚岩体样品不具有经典埃达克质岩石特征(图 8), 可能与“交代岩石圈地幔熔融”和“富集岩石圈地幔派生的钾玄质岩石分离结晶”两种有幔源物质参与的成因机制有关。

麻棚岩体具有高 Ba-Sr 花岗岩的特征。麻棚岩体 Hf 同位素数据中岩浆锆石的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值, 表明其岩浆有古老地壳熔融的贡献; 样品中 2 个继承锆石的

U-Pb 同位素年龄(1767 ± 36 和 1877 ± 28 Ma), 表明其壳源岩浆是前寒武纪变质基底(以古元古代-新太古代岩石为主)部分熔融形成的。麻棚岩体岩石中普遍存在幔源岩浆与壳源岩浆复杂相互作用下形成的几厘米至几十厘米不等的暗色闪长质包体(陈斌等, 2005; 门文辉等, 2014), 说明麻棚岩体岩浆有幔源岩浆的贡献。中生代时期, 华北克拉通中部带在碰撞后伸展环境下发生了富集岩石圈地幔减压熔融、底侵和壳-幔岩浆混合(Liu *et al.*, 2004; 翟明国等, 2005; 刘俊来等, 2008; Zhang *et al.*, 2013; 王亚莹等, 2017), 进而产生了深部岩浆抽取, 发生了岩石圈减薄(王亚莹等, 2017)。

综上所述, 位于华北克拉通中部带的麻棚岩体形成于中生代复杂的岩石圈减薄地质活动背景之下, 形成麻棚岩体的岩浆一部分来自于前寒武纪变质基底(以古元古代-新太古代岩石为主)组成的地壳的部分熔融, 另外一部分幔源岩浆的加入混合使其具有高 Ba-Sr 花岗岩的特征。

5 结论

(1) 麻棚岩体由中心到边缘的似斑状二长花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄为 129.4 ± 1.4 、 131.2 ± 2.2 和 129.5 ± 1.3 Ma, 为同一期岩浆活动的产物。

(2) 麻棚岩体岩浆锆石的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-27.00 \sim -15.44$, 二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 $2358 \sim 1765$ Ma, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值远低于亏损地幔, 同时成岩时代远低于模式年龄, 表明该岩体的岩浆有老地壳部分熔融的贡献。

(3) 麻棚岩体具有较高的全碱、Ba、Sr、LREE 含量和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值, 较低的 MgO 、Rb、HREE 含量和 $\text{Mg}^{\#}$ 值, 明显亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 属于高 Ba-Sr 花岗岩, 是前寒武纪变质基底部分熔融形成的岩浆与幔源岩浆混合作用的结果。

致谢 中国地质科学院地质研究所耿元生先生在野外工作中给予了支持和帮助, 先生的野外指导使我受益匪浅, 在此表示衷心感谢。

References

- and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico: Indicators of East Pacific Rise subduction below southern Baja California? [J]. *Geology*, 29 (6): 531~534.
- Amelin Y, Halliday A N and Lee D C. 2000. Early-middle Archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 (24): 4 205~4 225.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology [J]. *Chem. Geol.*, 200: 155~170.
- Bouvier A, Janne B T, Jeffrey D, et al. 2008. The case for old shergottites [J]. *Earth Planet. Sc. Lett.*, 266(1~2): 105~124.
- Cai Jianhui, Yan Guohan, Chang Zhaoshan, et al. 2003. Petrological and geochemical characteristics of the Wanganzhen complex and discussion on its genesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 81~92 (in Chinese with English abstract).
- Cai Jianhui, Yan Guohan, Mu Baolei, et al. 2005. Zircon U-Pb age Sr-Nd-Pb isotopic compositions and trace element of Fangshan complex in Beijing and their petrogenesis significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 776~788 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bin, He Jingbo and Ma Xinghua. 2009. Petrogenesis of mafic enclaves from the north Taihang Yanshanian intermediate to felsic plutons: Evidence from petrological, geochemical and zircon Hf-O isotopic data [J]. *Sci. China Ser D-Earth Sci.*, (7): 922~934 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bin, Tian Wei, Zhai Mingguo, et al. 2005. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mesozoic magmatism in the Taihang Mountains and other places of the North China Craton, with implications for petrogenesis and geodynamic setting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 15~26 (in Chinese with English abstract).
- Choi S G, Rajesh V J, Seo J, et al. 2009. Petrology, geochronology and tectonic implications of Mesozoic high Ba-Sr granites in the Haemiaraea, Hongseong Belt, South Korea [J]. *Island Arc*, 18(2): 266~281.
- Defant M J, Clark L F, Stewart R H, et al. 1991. Andesite and dacite genesis via contrasting processes: The geology and geochemistry of El Valle Volcano, Panama [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 106(3): 309~324.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 347 (6 294): 662~665.
- Drummond M J and Defant M S. 1996. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 87(1): 205~215.
- Du Linlin, Yang Chonghui, Song Huixia, et al. 2020. Neoproterozoic-Paleoproterozoic Multi-Stage Geological Events and Their Tectonic Implications in the Fuping Complex, North China Craton [J]. *Journal of Earth Science*, 45 (9): 3 179~3 195 (in Chinese with English abstract).
- Fowler M B, Henney P J, Derbyshire, et al. 2001. Petrogenesis of high Ba-Sr granites: The Rogart pluton, Sutherland [J]. *Journal of Geological Society*, 158: 521~534.
- Fowler M B, Kocks H, Derbyshire D P F, et al. 2008. Petrogenesis of high Ba-Sr plutons from the northern Highlands Terrane of the British Caledonian Province [J]. *Lithos*, 105 (1~2): 129~148.
- Ge Xiaoyue, Li Xianhua, Chen Zhigang, et al. 2002. Geochemistry and petrogenesis of the Yanshanian medium-felsic high Sr and low Y igneous rocks in the eastern China: Constraints on the thickness of continental crust of eastern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47: 474~480 (in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zhou Tianren, et al. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (10): 2 595~2 604 (in Chinese with English abstract).
- Huang Qin. 1990. Physicochemical conditions and evolution law of diagenesis of hemp tent mixed rocks [J]. *Geogeochemistry*, (4): 24~26 (in Chinese with English abstract).
- Jian Ping, Cheng Yuqi, Liu Dunyi, et al. 2001. Petrographical study of metamorphic zircon: Basic roles in interpretation of U-Pb age of high grade metamorphic rocks [J]. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 183~191 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Shoutao, Yan Danping, Zhang Qi, et al. 2013. Zircon U-Pb age, geochemistry characteristics of Badaling granitoid complex and their geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (3): 769~780 (in Chinese with English abstract).
- Li Linlin, Han Baofu, Miao Guojun, et al. 2012. Geochronology, emplacement depth and tectonic implications of the Mapeng-Chiwawa granitic pluton in Fuping complex of the Taihang Mountains [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(3): 289~306 (in Chinese with English abstract).
- Li Ruibao, Pei Xianzhi, Ding Saping, et al. 2009. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the pipasi basic volcanic rocks within the Mian-Lue tectonic zone in the southern margin of West Qinling and its geological implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1 612~1 623 (in Chinese with English abstract).
- Li S R, Santosh M, Zhang H F, et al. 2013. Inhomogeneous lithospheric

- thinning in the central North China Craton: zircon U-Pb and S-He-Ar isotopic record from magmatism and metallogeny in the Taihang Mountains[J]. *Gondwana Research*, 23(1): 141~160.
- Li Zhenzhen. 2009. *Geochemistry, Zircon Genetic Mineralogy, U-Pb Geochronology of the Dyks around Shihu Gold Mine, Hebei Province and Its Implication on Gold Mineralization[D]*. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Liu Junlai, Davis G A, Ji Mo, et al. 2008. Crustal detachment and destruction of the North China craton: Constraints from Late Mesozoic extensional structures[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 72~81 (in Chinese with English abstract).
- Liu Rongfang. 2001. The structural geochemical characteristics of Shihu gold mines in Hebei province[J]. *Beijing Geology*, 13(4): 13~19 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaobin. 2009. *Genetic Mineralogy of Mapeng Intrusion from Mid-Taihang Mountain and Its Implication on Gold Mineralization[D]*. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Liu Yang, Li Chengming, Zheng Jie, et al. 2010b. The zircon SHRIMP U-Pb age of Mapeng granite complex in the northern Taihang Shan mountains and its implications [J]. *Geology and Exploration*, 46(4): 622~627 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Yuan H L, et al. 2004. U-Pb zircon ages and Nd, Sr, and Pb isotopes of lower crustal xenoliths from North China Craton: Insights onevolution of lower continental crust[J]. *Chemical Geology*, 211(1~2): 87~109.
- Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Li Wuping, et al. 2000. The main evolution pattern of Phanerozoic mantle in the eastern China: The "Mushroom Cloud" model[J]. *Earth Science Frontiers*, 7(1): 97~107 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. Squid 1. 02: A user's manual, Berkeley[J]. Geochronology Center Special Publication, 2: 1~19.
- Luo Zhaohua, Deng Jinfu, Zhao Guochun, et al. 1997. Characteristics of magmatic activities and orogenic process of Taihangshan intraplate orogen[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 22(3): 279 ~284 (in Chinese with English abstract).
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids[J]. *Lithos*, 46 (3): 411~429.
- Men Wenhui, Liu Jianchao, Zhang Haidong, et al. 2014. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and genesis of dark diorite enclaves in the Mapeng batholith, Shihu Gold Field[J]. *Acta Mieralogica Sinica*, 4(4): 487~495 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 37(3~4): 215~224.
- Morris P A. 1995. Slab melting as an explanation of Quaternary volcanism and aseismicity in southwest Japan[J]. *Geology*, 23: 395~398.
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of shoshonite rock association[J]. *Lithos*, 13(1): 97~108.
- Niu Shuyin, Dong Guorun and Xu Chuanshi. 1995. The origin and source of magma in the Taihangshan tectono-magmatic belt[J]. *Geological Review*, 41(4): 301~310 (in Chinese with English abstract).
- Peng T P, Wilde S A, Fan W M, et al. 2013. Late Neoarchean potassio-high Ba-Sr granites in the Taishan granite-greenstone terrane: Petrogenesis and implications for continental crustal evolution[J]. *Chemical Geology*, 344: 23~41.
- Pilet S, Hemandez J, Bussy F, et al. 2004. Short-term metasomatic control of Nb /Th ratios in the mantle sources of intraplate basalts[J]. *Geology*, 32(2): 113~116.
- Qian Qing, Chung Sunlin, Li Tongyi, et al. 2002. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Badaling high Ba-Sr granitoids: A comparison of igneous rocks from North China and the Dabie-Sulu Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 275~292 (in Chinese with English abstract).
- Sajona F G, Maury R C, Bellon H, et al. 1993. Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindano, Philippines[J]. *Geology*, 21: 1 007~1 010.
- Stern C R and Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 263~281.
- Stille P and Steiger H R. 1991. Hf isotope systematics in granitoids from the Central and Southern Alps[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 107: 273~278.
- Sui Zhenmin, Ge Wenchun and Xu Xuechun. 2009. Characteristics and geological implications of the Late Paleozoic post orogenic Shierzhan granite in the Great Xingan Range[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2 679~2 686 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publication*, 42(1): 313~345.
- Tarney J and Jones C E. 1994. Trace element geochemistry of orogenic igneous rocks and crustal growth models[J]. *Journal of the Geological Society*, 151(5): 855~868.
- Vervoort J D, Pachelt P J, Gehrels G, et al. 1996. Constraints on early Earth differentiation from Hafnium and Neodymium isotopes[J]. *Na-*

- ture, 379(15): 624~627.
- Wang Jiliang, Li Bingze, Zhou Dexing, et al. 1994. Geological Characteristics and Relationship between Rock Body and Metallization of Intermediate Acidity Rock Body, Hebei Province [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Wang Qichao, Ma Junliang and Zhang Jianzhong. 1995. Geochemical characteristics and genesis of Mapeng goldfield bordering Lingshou and Fuping Hebei China [J]. *Geochimica*, 24(1): 56~68 (in Chinese with English abstract).
- Wang W, Zeng L S, Gao L E, et al. 2018. Eocene-Oligocene potassic high Ba-Sr granitoids in the Southeastern Tibet: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Lithos*, 322: 38~51.
- Wang Yan and Zhang Qin. 2001. A granitoid complex from Badaling area, North China: Composition, geochemical characteristics and its implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 533~540 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yaying, Zeng Lingsen, Chen Fukun, et al. 2017. The evolution of high Ba-Sr granitoid magmatism from "crust-mantle" interaction: A record from the Laoshan and Huyanshan complexes in the central North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(12): 3 873~3 896 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhongliang, Zhao Rongxin, Zhang Qing, et al. 2014. Magma mixing for the high Ba-Sr Guojialing-type granitoids in Northwest Jiaodong Peninsula: Constraints from petrogeochemistry and Sr-Nd isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2 595~2 608 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zili, Chen Chao, Niu Shuyin, et al. 2007. Discussion on the genesis of Mapeng Granitic intrusion in the middle of Taihangshan Mountains [J]. *Hebei Geology*, 4: 6~9 (in Chinese with English abstract).
- Williams I. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion Microprobe [C]//McKibben M A, Shanks III W C and Ridley W I. Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralising Processes. Colorado: Society of Economic Geologists, 7: 1~35.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, et al. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, (6): 1 217~1 238 (in Chinese with English abstract).
- Xi Chaozhuang, Dai Tagen, Liu Wei, et al. 2008. Petrogeochemical characteristics of the intrusive bodies of Mapeng granitoids in western Hebei [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(2): 113~120 (in Chinese with English abstract).
- Xia Guoli and Li Yaohui. 2005. Analysis of the genesis type and structural environment of intrusive rocks in the Yanshan period in the northern section of the Taihang Mountains [J]. *Hebei Geological and Mineral Information*, 1: 2~9 (in Chinese with English abstract).
- Xia Guoli, Zhang Jiaqi and Pan Hongru. 2006. Granite genesis types and mineralization in the Yanshan period of the northern section of Taihang Mountain [J]. *Hebei Geology*, 2: 5~12 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Long, Rapp R P and Xu Jifeng. 2004. The role of deep processes controls on variation of compositions of adakitic rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 219~228 (in Chinese with English abstract).
- Xu J F, Ryuichi S, Marc J, et al. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust [J]. *Geology*, 30(12): 1 111~1 114.
- Xu Yigang. 2006. Formation of the Taihangshan gravity lineament by the diachronous lithospheric thinning of the North China Craton [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 14~22 (in Chinese with English abstract).
- Yang Dianfan, Li Gaoshan, Jia Keshi, et al. 1991. Study on the ore-forming conditions and genesis of Tuling and Shihu gold deposit in the Taihang Mountain Region [J]. *Journal of Changchun College of Geology*, 21(1): 47~53 (in Chinese with English abstract).
- Ye H M, Li X H, Li Z X, et al. 2008. Age and origin of high Ba-Sr apinitic-granites at the northwestern margin of the Tibet Plateau: Implications for Early Paleozoic tectonic evolution of the Western Kunlun orogenic belt [J]. *Gondwana Research*, 13(1): 126~138.
- Zhai Mingguo, Fan Qicheng, Zhang Hongfu, et al. 2005. Lower crust processes during the lithosphere thinning in eastern China: Magma underplating, replacement and delamination [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1 509~1 526 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Haidong, Liu Jianchao, Wang Jinya, et al. 2016. Petrology, geochronology and geochemistry characteristics of Wang'anzen complex in the northern Taihang Mountain and their geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(3): 727~745 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Zhu R X, Santosh M, et al. 2013. Episodic widespread magma underplating beneath the North China Craton in the Phanerozoic: Implications for craton destruction [J]. *Gondwana Research*, 23(1): 95~107.
- Zhang Mengmeng. 2020. Petrogenesis and Solidification Condition of Early Cretaceous Mapeng Pluton in the North Taihang Mountain [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).

- Zhang Qi, Wang Yan, Liu Hongtao, et al. 2003. On the space time distribution and geodynamic environments of adakites in China Annex: Controversies over differing opinions for adakites in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 10 (4): 385~400 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan and Wang Yuanlong. 2001. Preliminary study on the components of the lower crust in East China Plateau during Yanshanian Period: Constraints on Sr and Nd isotopic compositions of adakite-like rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17 (4): 505~513 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yaxiong and Hu Xiangzhao. 1994. Research on the characteristics of Mabeng granitic intrusion and its contribution to the gold ore metallogeny [J]. *Journal of Central South Institute of Mining and Metallurgy*, 25 (3): 275~281 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Sun Mi, Wilde S A, et al. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited [J]. *Precambrian Research*, 136 (2): 177~202.
- Zhao G C and Zhai M G. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications [J]. *Gondwana Research*, 23 (4): 1 207~1 240.
- Zhou Zhenhua, Ouyang Hegen, Wu Xinli, et al. 2014. Geochronology and geochemistry study of the biotite granite from the Daolundaba Cu-W polymetallic deposit in the Inner Mongolia and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (1): 9~94 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Rixiang, Xu Yigang, Zhu Guang, et al. 2012. Destruction of the North China Craton [J]. *Sci. China Earth Sci.*, (8): 1 135~1 159 (in Chinese with English abstract).
- 杜利林, 杨崇辉, 宋会侠, 等. 2020. 华北克拉通阜平杂岩新太古代—古元古代多期地质事件及其构造性质 [J]. *地球科学*, 45 (9): 3 179~3 195.
- 葛晓月, 李献华, 陈志刚, 等. 2002. 中国东部燕山期高Sr低Y型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约 [J]. *科学通报*, 47 (6): 474~480.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石Hf同位素的分析方法及地质应用 [J]. *岩石学报*, 23 (10): 2 595~2 604.
- 黄钦. 1990. 麻棚岩体的成岩物理化学条件及演化规律 [J]. *地质地球化学*, (4): 24~26.
- 简平, 程裕淇, 刘敦一. 2001. 变质锆石成因的岩相学研究——高级变质岩U-Pb年龄解释的基本依据 [J]. *地学前缘*, (3): 183~191.
- 焦守涛, 严丹平, 张旗, 等. 2013. 八达岭花岗岩的年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 29 (3): 769~780.
- 李林林, 韩宝福, 苗国均, 等. 2012. 太行山阜平杂岩中麻棚-赤瓦屋岩体的时代、侵位深度及构造意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 31 (3): 289~306.
- 李瑞保, 裴先治, 丁仁平, 等. 2009. 西秦岭南缘勉略带琵琶寺基性火山岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其构造意义 [J]. *地质学报*, 83 (11): 1 612~1 623.
- 李真真. 2009. 冀西石湖金矿区脉岩的岩石学、锆石成因矿物学和年代学及其与金矿化的关系 [D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 刘俊来, Davis G A, 纪沫, 等. 2008. 地壳的拆离作用与华北克拉通破坏: 晚中生代伸展构造约束 [J]. *地学前缘*, 15 (3): 72~81.
- 刘荣访. 2001. 河北省灵寿县石湖金矿的构造地球化学特征 [J]. *北京地质*, 13 (4): 13~19.
- 刘小滨. 2009. 太行山中段麻棚岩体成因矿物学及其与成矿的关系 [D]. 北京: 中国地质大学(北京),
- 刘阳, 李程明, 郑杰, 等. 2010. 太行山北段麻棚岩体锆石SHRIMP U-Pb年龄及其意义 [J]. *地质与勘探*, 46 (4): 622~627.
- 路风香, 郑建平, 李伍平, 等. 2000. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式: “蘑菇云”模型 [J]. *地学前缘*, 7 (1): 97~107.
- 罗照华, 邓晋福, 赵国春, 等. 1997. 太行山造山带岩浆活动特征及其造山过程反演 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 22 (3): 279~284.
- 门文辉, 刘建朝, 张海东, 等. 2014. 石湖金矿区麻棚岩体内暗色闪长岩包体LA-ICP-MS锆石年代学及成因探讨 [J]. *矿物学报*, (4): 487~495.
- 牛树银, 董国润, 许传诗. 1995. 论太行山构造岩浆带的岩浆来源及其成因 [J]. *地质论评*, 41 (4): 301~310.

附中文参考文献

- 蔡剑辉, 阎国翰, 常兆山, 等. 2003. 王安镇岩体岩石地球化学特征及成因探讨 [J]. *岩石学报*, 19 (1): 81~92.
- 蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊, 等. 2005. 北京房山岩体锆石U-Pb年龄和Sr、Nd、Pb同位素与微量元素特征及成因探讨 [J]. *岩石学报*, 21 (3): 776~788.
- 陈斌, 贺敬博, 马星华. 2009. 北太行山燕山期中酸性岩体中暗色包体的成因: 岩石学、地球化学和锆石Hf-O同位素证据 [J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, (7): 922~934.
- 陈斌, 田伟, 翟明国, 等. 2005. 太行山和华北其它地区中生代岩浆作用的锆石U-Pb年代学和地球化学特征及其岩浆成因和地球动力学意义 [J]. *岩石学报*, (1): 15~26.

- 钱青, 钟孙霖, 李通艺, 等. 2002. 八达岭基性岩和高 Ba-Sr 花岗岩地球化学特征及成因探讨: 华北和大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩的对比[J]. 岩石学报, (3): 275~292.
- 隋振民, 葛文春, 徐学纯, 等. 2009. 大兴安岭十二站晚古生代后造山花岗岩的特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 25(10): 2 679~2 686.
- 王季亮, 李丙泽, 周德星, 等. 1994. 河北中酸性岩地质特征及其与成矿关系[M]. 北京: 地质出版社.
- 王启超, 马俊良, 张建中. 1995. 河北省灵寿县阜平接壤地带麻棚金矿田的地球化学特征及矿床成因[J]. 地球化学, 24(1): 56~68.
- 王焰, 张旗. 2001. 八达岭花岗杂岩的组成、地球化学特征及其意义[J]. 岩石学报, 17(4): 533~540.
- 王亚莹, 曾令森, 陈福坤, 等. 2017. “壳-幔”混合成因高 Ba-Sr 花岗质岩浆演化——以华北克拉通中部带老山和狐偃山岩体为例[J]. 岩石学报, 33(12): 3 873~3 896.
- 王中亮, 赵荣新, 张庆, 等. 2014. 胶西北高 Ba-Sr 郭家岭型花岗岩岩浆混合成因: 岩石地球化学与 Sr-Nd 同位素约束[J]. 岩石学报, 30(9): 2 595~2 608.
- 王自力, 陈超, 牛树银, 等. 2007. 太行山中段麻棚岩体的成因探讨[J]. 河北地质, 4: 6~9.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, (6): 1 217~1 238.
- 息朝庄, 戴塔根, 刘伟, 等. 2008. 冀西麻棚花岗岩类侵入岩岩石地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 27(2): 113~120.
- 夏国礼, 李耀辉. 2005. 太行山北段燕山期侵入岩成因类型及构造环境分析[J]. 河北地质矿产信息, 1: 2~9.
- 夏国礼, 张家奇, 潘洪儒. 2006. 太行山北段燕山期花岗岩成因类型及其成矿作用[J]. 河北地质, 2: 5~12.
- 肖龙, Rapp R P, 许继峰. 2004. 深部过程对埃达克质岩石成分的制约[J]. 岩石学报, 20(2): 219~228.
- 徐义刚. 2006. 太行山重力梯度带的形成与华北岩石圈减薄的时空差异性有关[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 31(1): 14~22.
- 杨殿范, 李高山, 贾克实, 等. 1991. 太行山区土岭、石湖金矿床成矿条件及成因探讨[J]. 长春地质学院院报, 21(1): 47~54.
- 翟明国, 樊祺诚, 张宏福, 等. 2005. 华北东部岩石圈减薄中的下地壳过程: 岩浆底侵、置换与拆沉作用[J]. 岩石学报, 21(6): 1 509~1 526.
- 张海东, 刘建朝, 王金雅, 等. 2016. 太行山北段王安镇杂岩体岩石学、年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 32(3): 727~745.
- 张萌萌. 2020. 北太行中生代麻棚岩体的成因及其冷却固结条件[D]. 北京: 中国地质大学(北京),
- 张旗, 王焰, 刘红涛, 等. 2003. 中国埃达克岩的时空分布及其形成背景附:《国内关于埃达克岩的争论》[J]. 地学前缘, 10(4): 385~400.
- 张旗, 王焰, 王元龙. 2001. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr、Nd 同位素制约[J]. 岩石学报, 17(4): 505~513.
- 张亚雄, 胡祥昭. 1994. 麻棚岩体特征及其与金矿成因关系研究[J]. 中南矿冶学院学报, 25(3): 275~281.
- 周振华, 欧阳荷根, 武新丽, 等. 2014. 内蒙古道伦达坝铜钨多金属矿黑云母花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 30(1): 79~94.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等. 2012. 华北克拉通破坏[J]. 中国科学: 地球科学, (8): 1 135~1 159.